

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. В. Пілінський, Д. В. Тітков, В. Б. Швайченко

**ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ:
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою
програмою «Електронні системи мультимедіа
та засоби Інтернету речей» спеціальності 171 «Електроніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Рецензент: Лисенко О. М. д.т.н., професор

Відповідальний редактор: Лазебний В. С., к.т.н., доцент

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 30.04. 2020 р.)*

*за поданням Вченої ради Факультету електроніки
(протокол № 04/2020 від 28.04. 2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Пілінський Володимир Володимирович, канд. техн. наук, професор

Тітков Дмитро Валерійович, старший викладач

Швайченко Володимир Борисович, канд. техн. наук, доцент

ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ: РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль: розрахунково-графічна робота. [Електронний ресурс]: Навчальний посібник для студентів спеціальності 171 «Електроніка», освітня програма «Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей» / Пілінський В. В., Тітков Д. В., Швайченко В. Б.; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 10,4 Мбайт). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 34 с.

Мета розрахунково-графічної роботи полягає у наданні допомоги студентам удосконалити опанування та практичні навички щодо проектування радіолінії, наведено розрахунок параметрів радіолінії за ідеалізованої ситуації, тобто без додаткових втрат, лише – за основними втратами (із застосуванням формули Фріїса) та методики на підґрунті статистичної моделі («Кривих поширення» Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ)). Практична цінність роботи полягає у тому, що наведені положення і методики можуть бути застосовані фахівцями для проектування конкретних ліній безпроводового зв'язку.

© Пілінський В.В., Тітков Д.В., Швайченко В.Б., 2020

© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. СТРУКТУРА РГР	5
2.ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ПРОФІЛЮ ТРАСИ	6
3. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТА ПОТУЖНОСТІ ЗА УМОВ ІДЕАЛЬНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ	11
3.1 Стисла класифікація радіохвиль.....	11
3.2 Розрахунок за формулами ідеального радіозв'язку	12
4. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯНА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ	17
4.1 Визначити	17
4.2 Вхідні дані:.....	17
4.3 Стратегія.....	17
4.4 Розрахунок	19
4.5 Висновки	24
ЛІТЕРАТУРА	25
ДОДАТОК.....	26

ВСТУП

Мета роботи

Метою розрахунково-графічної роботи є:

- удосконалення теоретичних знань і застосування раціональних програмних засобів задля проектування безпроводових ліній зв'язку;
- опанування роботи з фаховою літературою та довідниками для проектування систем безпроводового радіозв'язку;
- обґрунтованого застосування баз даних геоінформаційних систем (ГІС).

Розрахунково-графічна робота сприяє кращому засвоєнню інформації, отриманої студентами під час лекційних і практичних занять, застосуванню професійних знань задля коректного виконання відповідного інженерного завдання.

Тематика розрахунково-графічної роботи

Вхідними даними для проектування радіолінії є координати розташування та технічні параметри передавального і приймального пристроїв: потужність передавача, носійна частота, характеристики і умови розташування антен, характер і особливості місцевості, відсоток часу, за якого напруженість електричного поля перевищує прогнозований рівень. Топологію траси та характер місцевості визначають за топографічними або електронними картами місцевості.

Основні тематичні етапи виконання

1. Складення профілю траси та визначення її основних характеристик (середня висота, кут просвіту та характер місцевості) відповідно до індивідуального завдання).
2. Розрахунок напруженості електричного поля за умов відсутності втрат.
3. Розрахунок напруженості електричного поля за статистичною моделлю для конкретної траси за вихідними даними та топологією траси.
4. Порівняння результатів розрахунків, отриманих за формулою ідеального радіозв'язку та статистичною моделлю.
5. Формулювання висновків

Посібник підготовлено із застосуванням матеріалів [1-6].

1. СТРУКТУРА РГР

1.Завдання

Спроекувати радіолінію: визначити параметри сигналу на вході приймальної антени, втрати потужності та напруженості електричного поля радіохвилі: 1) за формулою ідеального радіозв'язку (формула Фрііса) та 2) за методикою прогнозування зон покриття на основі статистичної моделі напруженості електричного поля сигналу (за «Кривими поширення МСЕ»).

Вхідні дані:

<i>Параметри*</i>	
1	<i>Носійна частота, МГц</i>
2	<i>Потужність випромінювання $P_{\text{пер}}$, Вт</i>
3	<i>Профіль та довжина траси **</i>
4,5	<i>Коефіцієнти спрямованої дії антен $D_{\text{пер}}$ ($D_{\text{пр}}$) відносна величина або у децибелах</i>
6	<i>Висота щогли передавальної антени $h_{\text{пер}}$, м</i>
7	<i>Висота приймальної антени $h_{\text{пр}}$</i>
8	<i>Поляризація, γ</i>

Примітки:

* Окремі пункти завдання розрахунково-графічної роботи за погодженням з викладачем можуть бути уточнені або замінені на початку виконання роботи.

** Визначено окремо для кожного студента. Також може бути узгоджено

2. Вхідні параметри для розрахунку радіолінії

Анени розташовано на суходолі у містах. Точки розміщення антен треба вибрати самостійно, їх координати визначають з відповідного фрагменту мапи місцевості. Завдання надано окремим документом,

3. Стратегія

Скласти самостійно за розділами 2...4.

4.Розрахунок

Виконати згідно з цим навчальним посібником в електронному форматі

5. Відповідь (Висновки)

За такою структурою треба зробити розрахунки за ідеальних умов (згідно з розділом 3) та за статистичною моделлю (згідно з розділом 4).

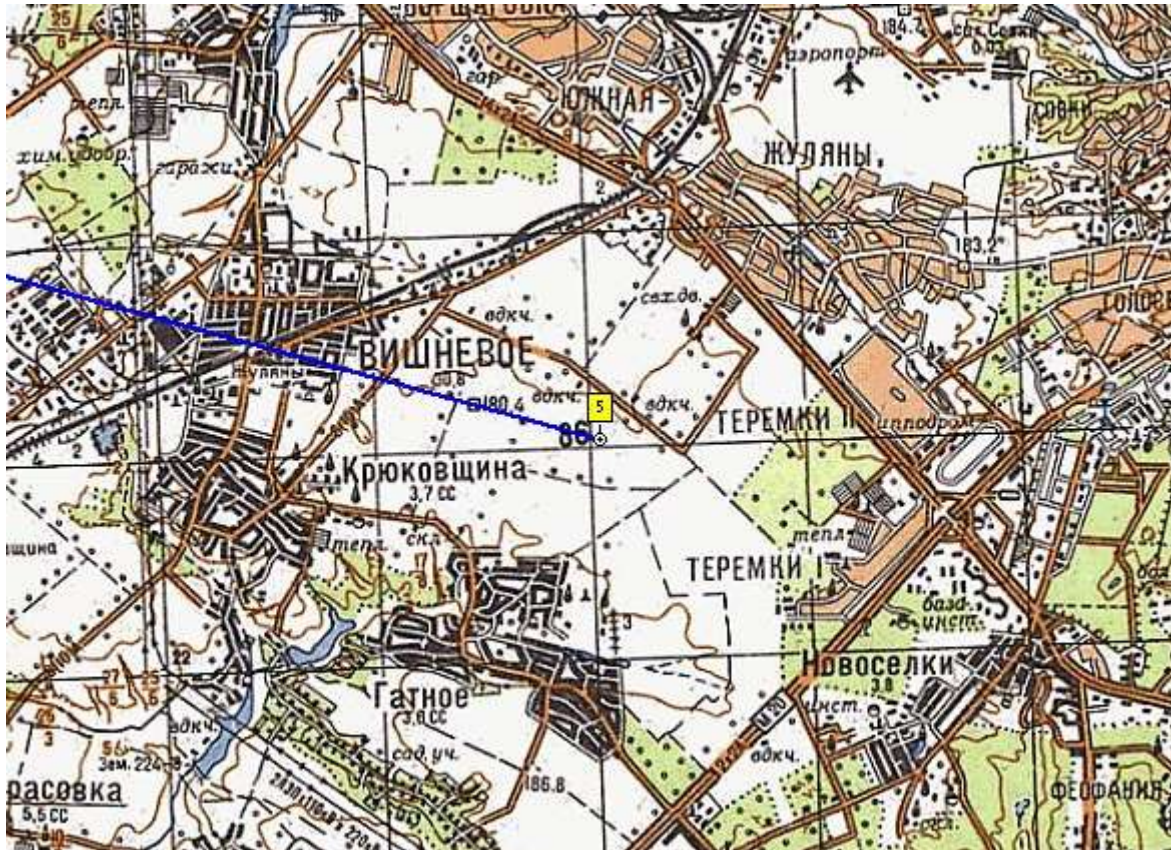


Рисунок 2.2 – Точка 5 (Київ)

Висота А = 172 м,
 висота Б = 86 м,
 відстань між пунктами АБ = 45 км.

Для демонстрації методики розрахунків розподілимо відстань на 4 частини (5 точок) – рис. 2.3. Зауважимо, що для розрахунків реальних трас кількість інтервалів розподілу траси залежить від конкретного завдання. Під час виконання розрахунків можна орієнтовно обрати інтервал 10 км.

Для наведеного прикладу – відстань між точками обираємо $d = 45/4 = 11,25$ км.



Рисунок 2.3 – Точки траси (вздовж синьої лінії)

За картою визначимо висоти точок та їх координати

Таблиця 2.1 – Точки визначення траси.

N точки	Широта	Довгота	Висота
1 (А)	50°28,916N	29°48,676E	172м
2	50°27,306N	29°57,828E	185м
3	50°27,734N	30°06,949E	179м
4	50°24,222N	30°15,615E	152м
5 (Б)	50°22,599N	30°24,798E	86м

Профіль траси містить висоти проміжних точок місцевості та точок розташування передавача та приймача. До висот траси треба додати поправку на кривизну поверхні Землі (рис. 2.4).

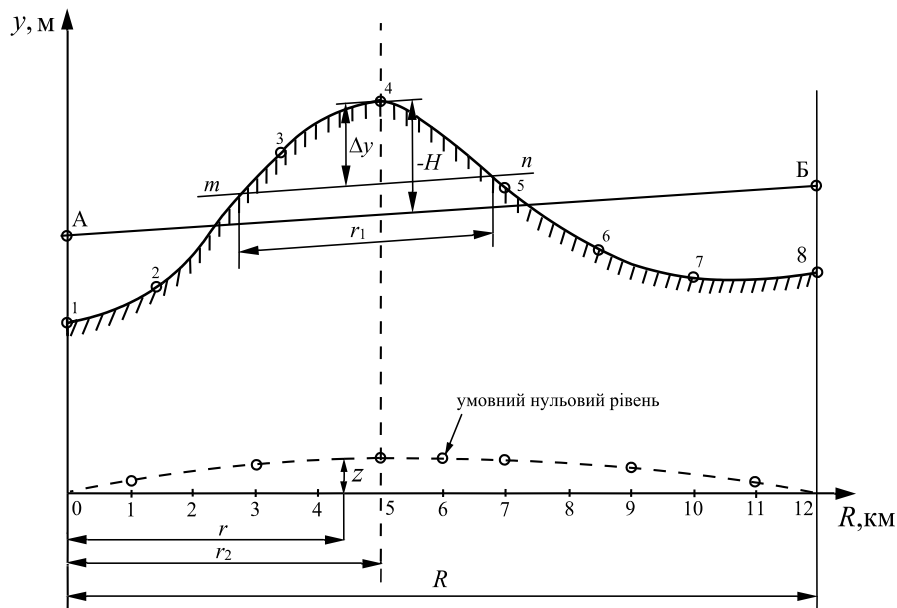


Рисунок 2.4 – Приклад профілю траси між передавачем та приймачем в прямокутних координатах

Кривизну поверхні Землі враховують умовною лінією нульового рівня, що має форму параболи, визначеної за формулою:

$$z = \frac{R^2}{2 \cdot R_{\text{екв}}} k(1-k), \quad (2.1)$$

де $k = \frac{r}{R}$ – відношення відстані від початку координат до точки, в якій визначають z , до відстані між передавачем та приймачем,

$R_{\text{екв}}$ – еквівалентний радіус Землі з урахуванням стандартної рефракції ($R_{\text{екв}} = 8500 \text{ км}$ – тому $17 \cdot 10^6 = 2 R_{\text{екв}}$)

Цю формулу можна записати також таким чином:

$$z = \frac{r(R-r)}{17 \cdot 10^6}. \quad (2.1a)$$

Результати розрахунків наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок поправки z , та реального рівня поверхні

№ точки	Висота, h	Відстань до т. А	z	$h + z$
1 (А)	172м	0	0	171
2	185м	11,25	0,022334559	185,0223346
3	179м	22,5	0,029779412	179,0297794
4	152м	33,75	0,022334559	152,0223346
5 (Б)	86м	45	0	86

Складений профіль траси наведено на рис. 2.5. Вертикальна вісь – висота у метрах; синій графік (без маркерів) – профіль траси, червона лінія (з маркерами – трикутники, нижня) – поправка z лише задля візуалізації рисунка збільшена у 1000 разів. Стосовно завдань цього проекту відстань порівняно невелика, тому поправка незначна, проте треба, щоб це знали.

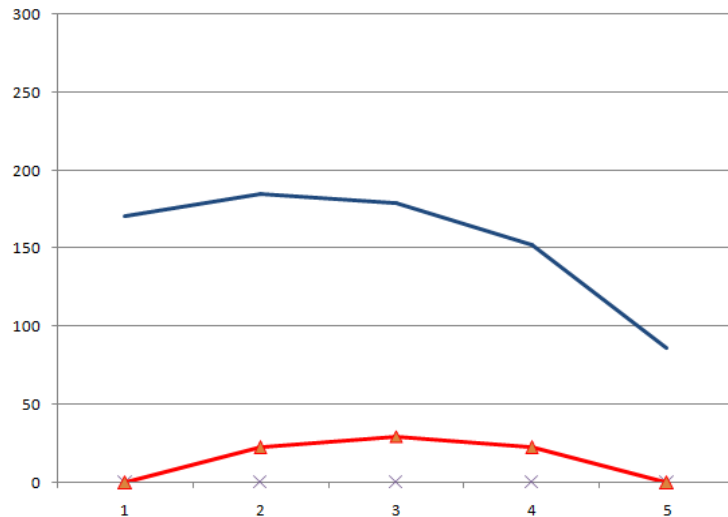


Рисунок 2.5 – Профіль траси без урахування висоти антенних щогл

В цьому прикладі криві профілю траси з поправкою і без поправки розташовані дуже близько, й на рис. 2.5 вони співпадають, внаслідок невеликої відстані між антенами. На такій відстані кривизна Землі незначна. У разі розрахунку трас з більшими відстанями між антенами, кривизна Землі впливатиме більше.

На рис. 2.6 наведено профіль траси з урахуванням висоти антенних щогл

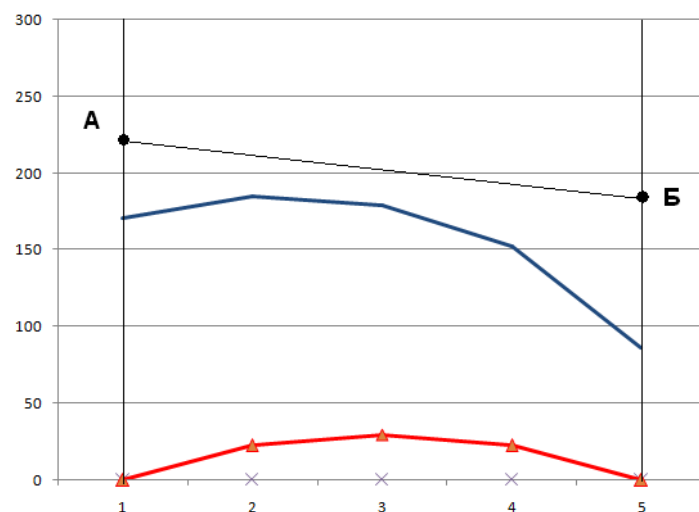


Рисунок 2.6– Профіль траси з антенами

Як впливає з рис. 2.6 – радіотраса відкрита, тобто антени розташовано за умов прямій видимості.

3. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТА ПОТУЖНОСТІ ЗА УМОВ ІДЕАЛЬНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

3.1 Стисла класифікація радіохвиль

Досліджуємо поширення радіохвиль у довкіллі планети Земля, яка має радіус, що орієнтовно дорівнює $R_z = 6370 \text{ км}$. Газова оболонка, що охоплює Землю та обертається разом з нею має назву – атмосфера, яку поділяють на:

- тропосферу, яка містить 79% маси атмосфери;
- стратосферу (20% маси атмосфери);
- іоносферу (0,5% маси атмосфери).

Тропосфера: – сфера до висот: (7...10) км – полярні широти, (10...12) км – помірні, (16...18) км – екваторіальні, є неоднорідною. Її електродинамічні параметри: **діелектрична проникність** ϵ та **питома провідність** σ змінюються з висотою та метеорологічними умовами. Тропосфера впливає на поширення **земних** радіохвиль і поширення, **тропосферних**. Поширення цих радіохвиль пов'язане з явищами **рефракції** (викривлення траєкторії), **поглинання** і **розсіювання**.

Вище є **тропопауза** – вищий тонкий шар тропосфери, в якому немає зниження температури за висоти.

Наступний шар – **стратосфера** – сягає висот 50-60 км, має значно меншу густину газу – в десятки, сотні разів та температурну інверсію.

Тропосфера та стратосфера є нейтральним середовищем, тому їх називають **нейтросферою**, на відміну від наступного шару **іоносфери**.

Завершує атмосферу іонізований газ – іоносфера, що сягає орієнтовно висоти 20000 км.

Надалі – **космічний простір**.

Отже сила сигналу та траєкторія, вздовж якої енергія радіохвилі поширюються від джерела до точки спостереження, залежить від різних чинників.

Основними з них є частота сигналу та електродинамічні параметри і характер середовища.

Частоти радіохвиль розподіляють за діапазонами, за формулою: $(0,3...3) \cdot 10^n, \text{ Гц}$,

де $n=1..12$ – номер діапазону.

Наведемо спрощену класифікацію радіохвиль.

Радіохвилі, які поширюються у однорідних без перешкод середовищах, так званому, «вільному просторі» називають **прямі** або **вільні** (1) (рис. 3.1). Модель вільного простору – вакуум: з параметрами: $\epsilon = \epsilon_0 = 4 \pi 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$, $\sigma \rightarrow 0 \text{ См/м}$ (тобто за відносних значень: $\epsilon_r = 1, \mu_r = 1$).

Земними або **поверхневими** (2) називають радіохвилі, що поширюються безпосередньо біля поверхні та частково огинають Землю (рис.3.1).

Тропосферними (3) називають радіохвилі, що поширюються на значні відстані, внаслідок **рефракції**, (рис 3.1).

Іоносферними (4) називають радіохвилі, що поширюються на великі відстані та огинають Землю внаслідок відбиття від іоносфери (рис.3.1).

Вважають також **прямими** (5) радіохвилі, для яких іоносфера є **радіо прозорою** ($f > 30$ МГц), (рис. 3.1).

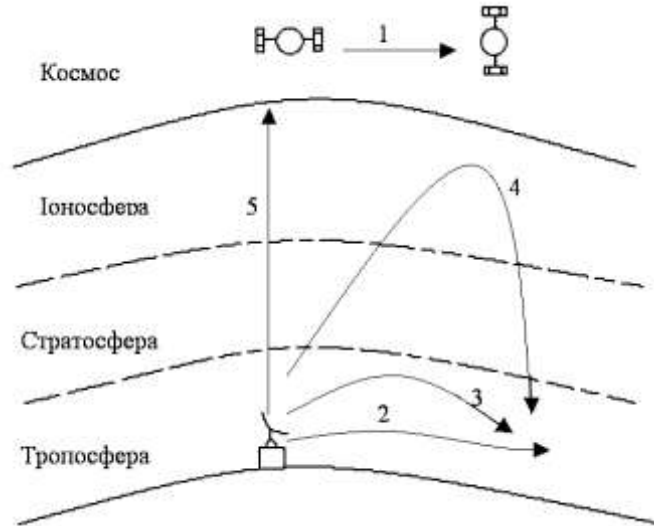


Рисунок 3.1 - Види поширення радіохвиль та шари атмосфери

3.2 Розрахунок за формулами ідеального радіозв'язку

1. Визначити:

напруженість електричного поля $E_{\text{пр}}$ та потужність $P_{\text{пр}}$ на антені приймача.

2. Вхідні дані:

- потужність передавача $P_{\text{пер}}$;
- носійна частота $f_{\text{нос}}$;
- коефіцієнти спрямованої дії передавальній та приймальній антен, відповідно: $D_{\text{пер}}$, $D_{\text{пр}}$ (зауважимо: для ізотропних антен $D_{\text{пер}} = 1$, $D_{\text{пр}} = 1$);
- поляризація антен;
- відстань між антенами передавача та приймача r .

3. Стратегія

1) У загальній ситуації енергія радіохвилі W умовно розподілена рівномірно на уявній сфері та визначає потужність випромінювання

$$P = \frac{\partial W}{\partial t}.$$

Нагадаємо, що за відомого значення модуля вектора Пойнтінга потужність передавача у будь якій точці зони поширення радіохвиль така:

$$P = \int_S \vec{\Pi} \cdot d\vec{S} = \Pi S,$$

де $\vec{\Pi}$ – вектор Пойнтинга, $S = 4\pi r^2$ – площа сфери.

Звідки значення модуля вектора Пойнтинга для сфери дорівнює:

$$\Pi = \frac{P}{4\pi r^2}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Нагадаємо, що вектор Пойнтинга є векторний добуток векторів напруженостей електричного та магнітного полів $\vec{E} \times \vec{H}$, які у хвильовій (дальній) зоні є взаємно перпендикулярні та синфазні; а його напрям визначає напрям поширення електромагнітної хвилі. Модуль вектора Пойнтинга визначаємо за формулою:

$$\Pi = \frac{1}{2} E_m H_m,$$

де E_m та H_m – амплітудні значення складових напруженості електричного та магнітного полів (\vec{E}, \vec{H}).

2) Нагадаємо поняття хвильового опору, сутність якого – це **коефіцієнт пропорційності** між напруженостями електричного та магнітного поля (слово опір застосовано тому, що одиниця вимірювання цієї величини є ом):

$$\dot{Z}_w = \frac{\dot{E}_m}{\dot{H}_m} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon + \sigma}}.$$

Для вільного простору:

$$Z_w = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \approx 377 \text{ Ом}.$$

Середньоквадратичне значення модуля вектора Пойнтинга для «вільного простору»:

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_m^2}{120\pi}, \text{ Вт/м}^2.$$

3) Отже амплітудне і середньоквадратичне значення напруженості електричного поля, відповідно:

$$E_m = \frac{\sqrt{60P}}{r}, \frac{\text{В}}{\text{м}}; \tag{3.1}$$

$$E = \frac{\sqrt{30P}}{r}, \frac{\text{В}}{\text{м}}. \quad (3.1a)$$

У децибелах напруженість електричного визначаємо відносно 1 мкВ/м:

$$E_{i \text{ дБ}} = 20 \lg(E_i / 1 \text{ мкВ/м}). \quad (3.1б)$$

4) Для практичного застосування зручними є одиниці вимірювання: **кіловат** – для потужності, **кілометр** – для відстані. За таких даних:

$$E_m = \frac{245 \sqrt{P_{[\text{кВт}]}}}{r_{[\text{км}]}} , \frac{\text{мВ}}{\text{м}}, \quad (3.1г)$$

$$E = \frac{173 \sqrt{P_{[\text{кВт}]}}}{r_{[\text{км}]}} , \frac{\text{мВ}}{\text{м}}. \quad (3.1д)$$

Ізотропні антени – це ідеальні випромінювачі, їх неможливо реалізувати і для багатьох практичних ситуацій вони не потрібні. На практиці застосовують антени, що випромінюють електромагнітне поле у визначеному напрямі. Ступінь концентрації потужності випромінювання визначає **коефіцієнт спрямованої дії** антени – D .

Тобто застосування спрямованих антен без втрат дає змогу зменшити потужність передавача у D разів.

Тоді амплітудне та середньоквадратичне значення напруженості електричного поля:

$$E_m = \frac{\sqrt{60PD}}{r}, \frac{\text{В}}{\text{м}}, \quad (3.2)$$

$$E = \frac{\sqrt{30PD}}{r}, \frac{\text{В}}{\text{м}}. \quad (3.2a)$$

5) Під час проектування радіоліній визначають потужність на вході антени приймача.

Цю формулу отримаємо множенням модуля вектора Пойнтінга на ефективну площу антени:

$$A_{\text{эф}} = \lambda^2 / 4\pi,$$

де λ – довжина хвилі

$$\lambda = \frac{f}{\nu},$$

де ν – швидкість поширення електромагнітної хвилі

$$\nu = 1 / \sqrt{\mu\epsilon});$$

нагадаємо, що світло має електромагнітну природу, тобто – у вакуумі (вільному просторі), швидкість електромагнітної хвилі:

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \approx 3 \cdot 10^8, \text{ м/с }.$$

Отже, потужність на вході антени приймача:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}. \quad (3.3)$$

Цю формулу називають формулою *ідеального радіозв'язку*, або (*Friis Transmission Formula–Формула Фрііса*).

Нагадаємо, що коефіцієнт спрямованої дії антени D чисельно дорівнює коефіцієнту підсилення антени G за умови відсутності втрат у антені ($D = G / \eta$, тобто $\eta = 1$).

б) Співвідношення, що характеризує *втрати потужності у вільному просторі (free space)* за умови поширення радіохвиль, якщо $D_{\text{пер}} = 1$ $D_{\text{пр}} = 1$):

$$L_{fs} = \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2.$$

Втрати у процесі поширення з урахуванням коефіцієнтів спрямованої дії антен називають *основними втратами*:

$$L_0 = \frac{(4\pi r)^2}{D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \lambda^2}.$$

У зв'язку з тим, що значення потужностей на виході передавача та вході приймача відрізняються на декілька порядків, для аналізу даних та полегшення розрахунків, доцільно використовувати формули у *логарифмічних одиницях децибел* (дБ), якщо за опорний рівень прийнято потужність $P_{\text{оп}} = 1 \text{ Вт}$:

$$P_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{P}{P_{\text{оп}}}, \text{ дБ}, \quad (3.4)$$

або (дБм), якщо за опорний рівень прийнято потужність $P_{\text{оп}} = 1 \text{ мВт}$.

Отже, $0 \text{ дБ} = 30 \text{ дБм}$; $0 \text{ дБм} = -30 \text{ дБ}$; $P_{\text{дБм}} = P_{\text{дБ}} + 30$. Звертаємо увагу на те, що у формулах для *напруженості поля (напруги, сили струму)* у децибелах, застосовано коефіцієнт **20**: $E_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{E}{E_{\text{оп}}}$, (де $E_{\text{оп}} = 1 \frac{\text{мкВ}}{\text{м}}$), тому що $P \equiv E^2$.

У реальних умовах процес поширення радіохвиль над поверхнею Землі та в навколоземному просторі супроводжується *відбиванням, заломленням,*

поглинанням, розсіянням, рефракцією, дифракцією, що спричинює **додаткові втрати**, які враховують *множником послаблення* V у формулах ідеального радіозв'язку для *середньоквадратичного* та *амплітудного* значень напруженості електричного поля та потужності, відповідно :

$$E = \frac{173 \sqrt{P_{[\text{кВт}]} D}}{r_{[\text{км}]}} V, \frac{\text{мВ}}{\text{м}}, \quad E_m = \frac{245 \sqrt{P_{[\text{кВт}]} D}}{r_{[\text{км}]}} V, \frac{\text{мВ}}{\text{м}},$$

де, якщо є зручним, можна застосувати одиниці вимірювання: потужності – **кіловат**, відстані – **кілометр**, напруженості поля **мілівольт/метр** (опорне значення для перерахунку у децибелі лишається 1 мкВ/м):

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2} V^2, \text{ Вт}$$

Нагадаємо, що для потужності маємо параметр додаткових втрат V^2 тому що $P \equiv E^2$. Це пояснює також, що у децибелах значення додаткових втрат однакові для напруженості поля і потужності.

Таким чином загальні втрати з урахуванням додаткових:

$$L = \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}} = \frac{L_0}{V^2} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda V} \right)^2 \cdot \frac{1}{D_{\text{пер}} D_{\text{пр}}}, \quad (3.5)$$

або, за відносними величинами (дБ):

$$L_{\text{дБ}} = 20(\lg 4\pi r - \lg \lambda) - V_{\text{дБ}} - D_{\text{пер дБ}} - D_{\text{пр дБ}}. \quad (3.5a)$$

4. Розрахунок

Виконуємо за наведеними вище формулами.

5. Відповідь (висновки)

Значення напруженості електричного поля у фізичних величинах X мкВ/м та децибелах Y (дБ мкВ/м).

Значення потужності у фізичних величинах X Вт (або ват з префіксом) та Y (дБ Вт) та/або Z (дБм).

Доцільною є перевірка: значення основних втрат (за ідеальних умов) має дорівнювати сумі (у децибелах) потужностей передавача та на вході приймальної антени (якщо значення від'ємне – треба застосовувати – модуль значення).

4. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Вступ

Основою даного проекту є Рекомендації Міжнародного Союзу Електро зв'язку (МСЕ) ITU-R. 370-7, де наведено, так звані Криві поширення радіохвиль у межах частот (30...1000) МГц, які отримано у результаті опрацювання великої кількості багаторічних експериментальних даних [4,5]. Криві поширення радіохвиль – це група залежностей напруженості електричного поля, що перевищують наведені значення у 50% місць (на ділянці 200x200 м²) для різних (50%, 10%, 5%, 1%) відсотків часу на відстанях від 10 км до 1000 км за ефективний висоти антени (напівхвильовий вібратор) передавача потужністю 1 кВт (30 дБ) від 37,5 м до 1200 м для різного довкілля: суходіл, море (тепле, холодне), місто, сільська місцевість, передмістя. Ці криві фактично призначені для прогнозування поширення радіохвиль наведених частот за конкретних умов.

4.1 Визначити

Напруженість електричного поля на вході приймальної антени (розташування приймача).

4.2 Вхідні дані:

- координати місць розташування передавача і приймача і, відповідно
- r – довжина траси, км;
- f – носійна частота (смуга частот), МГц;
- h_1 – ефективна висота передавальної антени, м (треба розрахувати);
- t – час, впродовж якого напруженість поля перевищує прогнозований рівень (50, 10, 5, 1), %;
- $D_{\text{пер}}, D_{\text{пр}}$ – фактичні коефіцієнти спрямованої дії передавальній та приймальній антен, відповідно;
- вид поляризації антен.

4.3 Стратегія

Розрахунок напруженості поля для певної радіолінії виконують за формулою [6]:

$$E = E_0 + P - 30 + K_{\Delta h} + K_{h_2} + K_{\text{terra}} + K_{\theta} + K_{\Delta N} + G(\theta), [\text{дБ}], \quad (4.1)$$

де $E_0 = f(r, f, h_1, t)$, – функціональна залежність (*крива поширення*) за Рекомендаціями МСЕ;

P – випромінювана потужність, дБ (Вт);

$K_{\Delta h}$ – коефіцієнт, що залежить від ступеня нерівності місцевості, дБ, і визначають за графіком, який наведено на рис. 4.2;

K_{h_2} – коефіцієнт, який залежить від висоти приймальної антени, та характеру місцевості у зоні приймання, дБ;

K_{terra} – коефіцієнт, що залежить від процента пунктів приймання, для яких напруженість поля перевищить прогнозований рівень, дБ (рис.4.4), тут Δh характеризує нерівність місцевості;

θ – кут просвіту місцевості (рис. 4.5);

K_θ – коефіцієнт, що залежить від кута зазору місцевості, дБ (рис. 4.6);

$K_{\Delta N}$ – коефіцієнт, який враховує кліматичні зони, дБ;

$G(\theta)$ – коефіцієнт підсилення антени у напрямі, що визначає кут θ , дБ.

(Пояснення: $G(\theta) = D\eta$, де η ККД антени. – У цій роботі приймаємо, що антена без втрат, тому $G(\theta) = D$).

Ефективну висоту передавальної антени базової станції h_1 визначають як висоту над середнім рівнем місцевості в межах від 1 до 15 км (за Міжнародною Угодою) від передавача в напрямі місця розташування приймача (рис. 4.1).

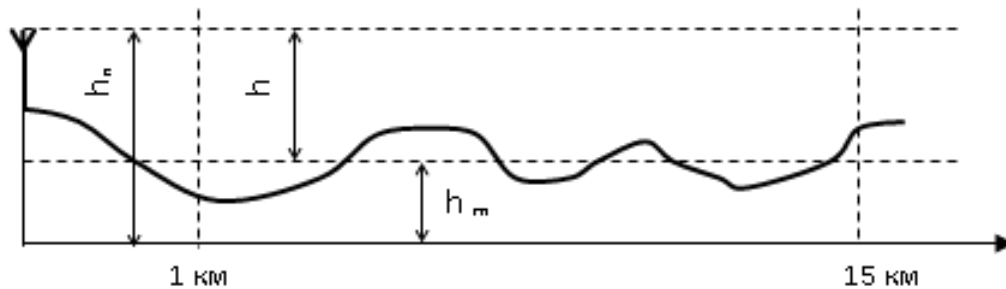


Рисунок 4.1 До визначення ефективній висоти передавальної антени

$$h_1 = h_n - h_m, \quad (4.2)$$

де h_n – фізична висота передавальної антени над рівнем моря, м;

h_m – середня висота місцевості над рівнем моря, м.

Визначаємо середню висоту місцевості h_m (наприклад, для 16 точок):

$$h_m = \frac{\sum_{i=1}^{16} h_i}{16}. \quad (4.3)$$

Для h_i необхідно застосовувати висоти на відстанях $(1000+i \cdot 100)$, м від передавача у напрямі приймача.

Якщо радіолінія менша 15 км, то враховують фактичну відстань до приймача.

Якщо радіолінія над водною поверхнею є більше 10 км треба також враховувати криві поширення над **морською поверхнею**, тоді якщо радіолінія над водною поверхнею є менш 10 км, треба застосовувати лише криві поширення над суходолом.

Для *змішаних трас* застосовують лінійну інтерполяцію за формулою:

$$E_{\text{зм}} = E_{\text{сд}} + \frac{r_{\text{м}}}{r_{\Sigma}} (E_{\text{м}} - E_{\text{сд}}), \quad (4.4)$$

де $E_{\text{зм}}$ – напруженість електричного поля для змішаної траси;

$E_{\text{сд}}$ – напруженість електричного поля для ділянки траси над суходолом, що *дорівнює довжині змішаної траси*,

$E_{\text{м}}$ – напруженість електричного поля для ділянки траси над водною поверхнею, що *дорівнює довжині змішаної траси*,

$r_{\text{м}}$ – довжина ділянки траси над водною поверхнею,

r_{Σ} – довжина всієї траси.

Значення напруженості поля для відстані d від 1 до 10 км в умовах поширення електромагнітних хвиль над *суходолом* визначають таким чином на діаграмі з логарифмічною шкалою відстані і лінійною шкалою напруженості поля, відповідну криву лінійно екстраполюють від точки 10 кілометрової відстані з градієнтом кривої напруженості поля у зоні 10 км – $\frac{\Delta E[\text{дБ}]}{\Delta r[\text{км}]}$. Якщо, ця екстрапольована крива перетинає криву вільного простору між 1 км і 10 км (точка d), напруженість поля вільного простору визначають додаванням значення $\frac{\Delta E}{\Delta r}(10-d)$ до значення $E_0(10 \text{ км})$.

Для сигналів з відношенням проходження/не проходження менш 1:10 та тривалістю циклу більше 30 с треба застосовувати криві для 50 % часу (за умови переривання носійної частоти). В інших ситуаціях треба застосовувати криві для 1% часу (носійна частота безперервна).

Якщо потужність передавача не дорівнює 1 кВт, значення напруженість поля розраховують як:

$$E = E_{1\text{кВт}} \sqrt{\frac{P}{1\text{кВт}}}, \quad (4.5)$$

де $E_{1\text{кВт}}$ – значення напруженості електричного поля з кривих поширення для випромінюваної потужності 1 кВт.

Або підстановкою реального значення потужності передавача у децибелах у формулу (4.1), де число 30 дБ означає 1 кВт.

Надалі виконуємо розрахунок.

4.4 Розрахунок

Записуємо формулу (4.1) та визначаємо складники формули.

Визначимо специфічні складники формули (4.1)

1. Коефіцієнт $K_{\Delta h}$ характеризує *нерівномірність місцевості Δh* . Криві поширення над суходолом наведено за умови $\Delta h = 50 \text{ м}$. Якщо

нерівності місцевості відмінні від $\Delta h = 50$ м, то необхідно застосувати **поправний коефіцієнт** для напруженості електричного поля радіозавад, що отримано з кривих поширення, за рис.4.2.

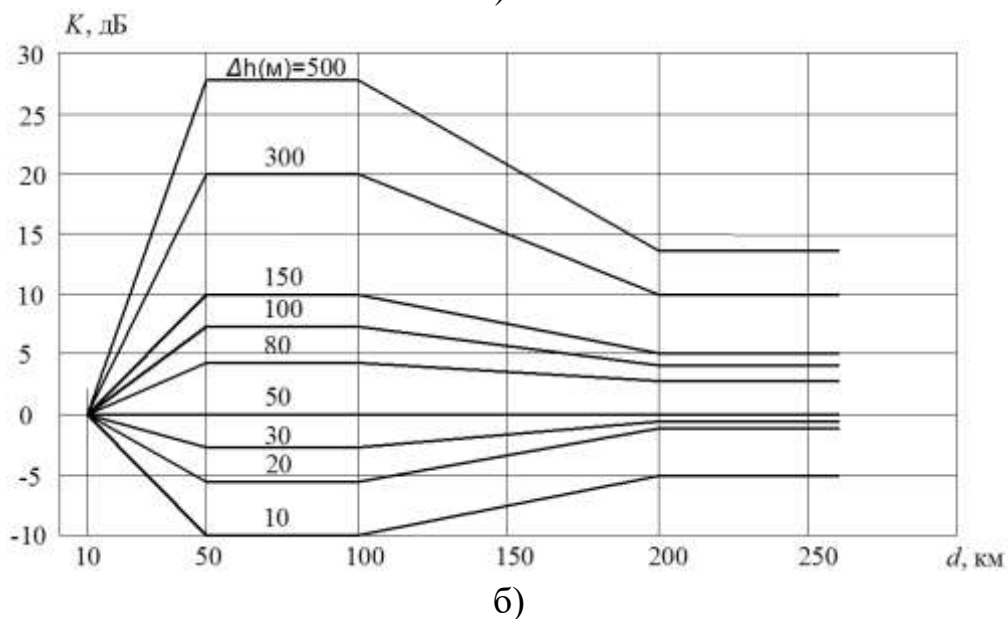
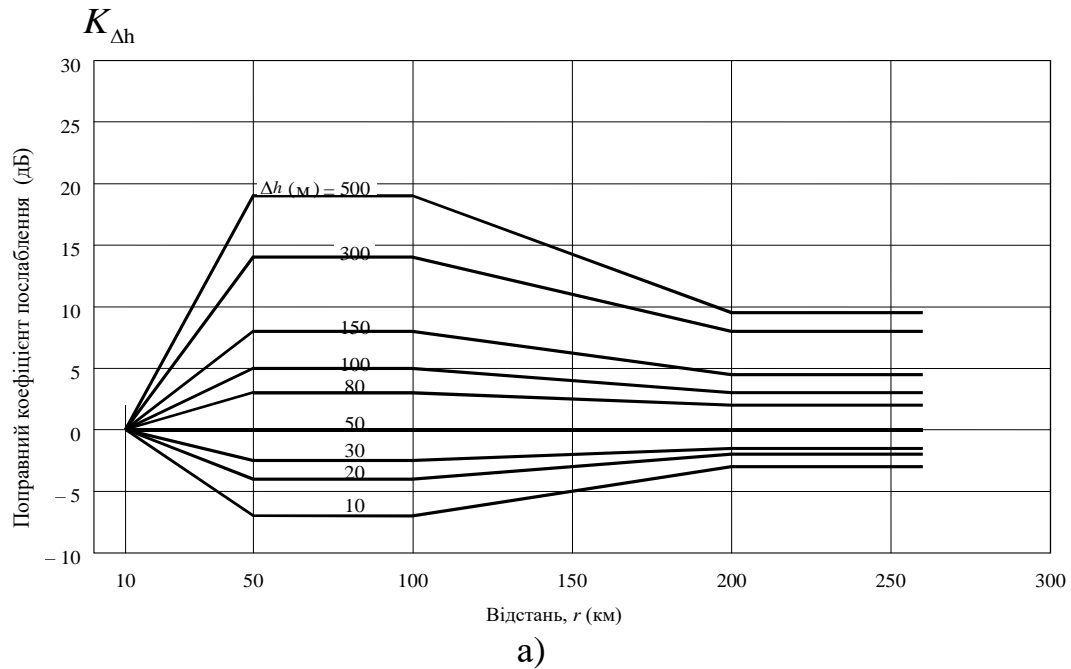


Рисунок 4.2 – Залежність поправного коефіцієнта $K_{\Delta h}$ для смуг частот:
а – від 80 МГц до 250 МГц; б – від 450 МГц до 1000 МГц

Нерівність поверхні Δh визначають як різницю висот, на рівнях 10% й 90 % відповідно висоти місцевості, вимірюваних у межах від 10 км до 50 км від передавача в напрямі місця розташування приймача (рис. 4.3). Якщо траса від передавача до приймача менше за 50 км, то необхідно враховувати фактичну відстань до приймача.

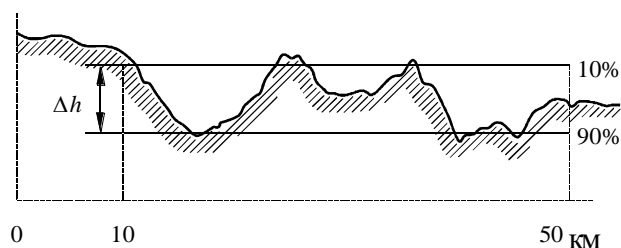


Рисунок 4.3 – До визначення нерівномірності поверхні радіотраси (50 км –приклад)

2. Коефіцієнт K_{h2} , для врахування висоти антени приймача. Висоту антени приймача визначають як висоту над рівнем земної поверхні у місці розташування антени. Криві поширення наведено за умови висоти антени приймача, що становить 10 м над рівнем земної поверхні. Для інших значень висоти антени приймача напруженість поля, отримана з кривих поширення, має бути скорегована. Поправні коефіцієнти для ситуації зменшення висоти антени приймача від 10 м до 3 м наведено у табл. 4.1. Поправні коефіцієнти для відстаней від 50 до 100 км визначають за лінійною інтерполяцією.

Таблиця 4.1 – Поправні коефіцієнти K_{h2}

Смуга частот	Відстань <50 км	Відстань >100 км
29.7 – 300 МГц	- 8 дБ	- 5 дБ
300 – 1880 МГц	- 10 дБ	- 3 дБ

Також можливо коефіцієнт K_{h2} для розрахунку напруженості поля для висот приймальної антени h_2 від 1,5 до 40 м визначати за формулою:

$$K_{h2} = \frac{c}{6} 20 \lg \left(\frac{h_2}{10} \right), [\text{дБ}], \quad (4.6)$$

де параметр c наведено у табл. 4.2 :

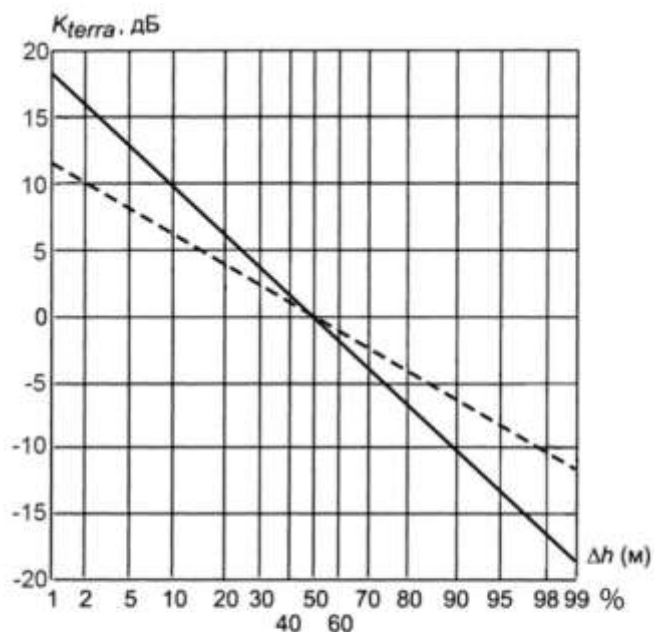
Таблиця 4.2– Значення коефіцієнта c

Зона	c , дБ	
	ДВЧ (30...300) МГц	УВЧ (0,3...3) ГГц
Сільська	4	4
Приміська	5	6
Міська	6	8

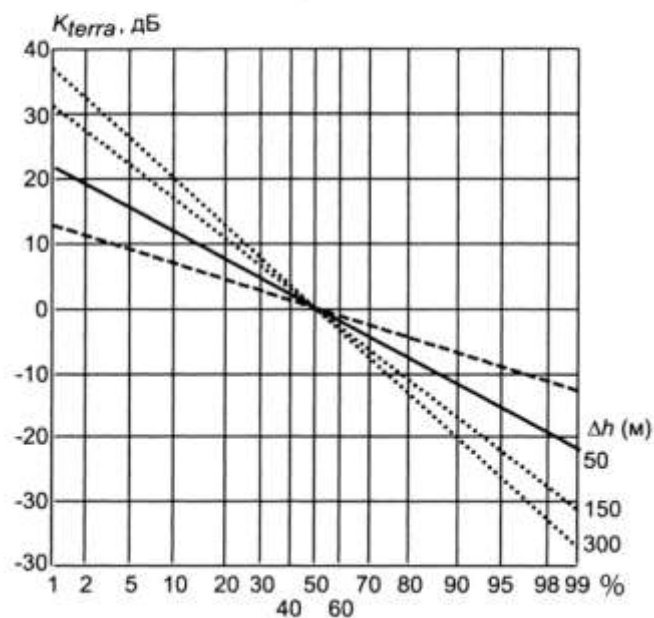
3. Коефіцієнт K_{terra} , за який враховано відносна місцевість задовільного приймання з урахуванням *характеру профілю траси*. Зміни сигналу виникають через зміну геометрії всієї траси поширення, наприклад, через наявність пагорбів. Відмінність розташувань оцінюють для квадратних зон зі стороною (100...200) м з додатковою умовою, що зона має бути пласкою. На

рис.4.4 показано залежність коефіцієнту K_{terra} , дБ, від відсотка пунктів приймання, для якого напруженість електричного поля перевищує прогнозований рівень.

Вважають, що у широкосмугових цифрових системах (ширина смуги не менше 1,5 МГц) втрати менше залежать від частотно-залежного положення кореспондентів ніж у аналогових системах. Для розрахунків в РГР слід обирати значення K_{terra} у межах діапазону (90...95)%.



a)



б)

Рисунок 4.4 – Коефіцієнт K_{terra} відношення напруженості електричного поля для заданого проценту пунктів приймання до напруженості поля за умови 50% пунктів приймання: а – (80...250) МГц; б – (450...1000) МГц

———— Аналогові системи
 - - - - - Цифрові системи (ширина смуги > 1.5 МГц)
 Аналогові системи для $\Delta h > 50$ м

4. Кут просвіту місцевості K_θ . Якщо на місцевості між передавачем і приймачем є спуски та підйоми, то необхідно скорегувати у місці приймання значення напруженості електричного поля. Визначення кута просвіту місцевості на поверхнею Землі наведено на рис.4.5.

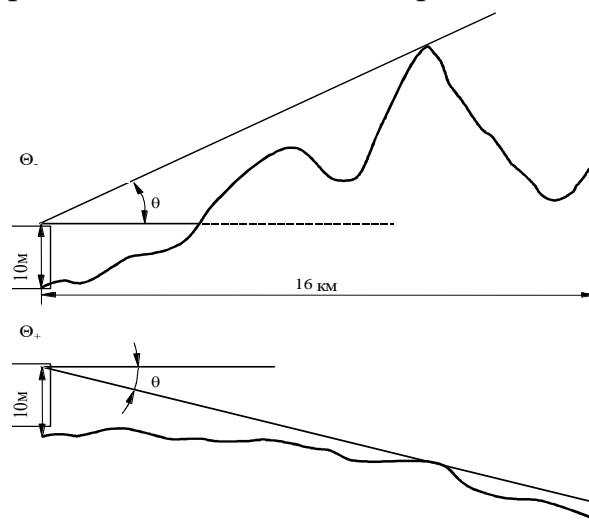


Рисунок 4.5 – До визначення кута просвіту місцевості радіолінії

Поправні коефіцієнти для різних значень кутів просвітку місцевості θ (у радіанах) розраховують за формулами:

$$K_\theta = 1,2 - 20 \lg(\sqrt{(-35,6 \cdot \theta - 0,1)^2 + 1} - 35,6 \cdot \theta - 0,1) \text{ для ДВЧ (30...300) МГц,} \quad (4.7)$$

$$K_\theta = 8 - 20 \lg(\sqrt{(-93,1 \cdot \theta - 0,1)^2 + 1} - 93,1 \cdot \theta - 0,1) \text{ для УВЧ (0,3...3) ГГц.} \quad (4.7a)$$

Поправний коефіцієнт для відстані 16 км наведено на рис.4.6. (Можна під час розрахунку також орієнтуватись на ці дані).

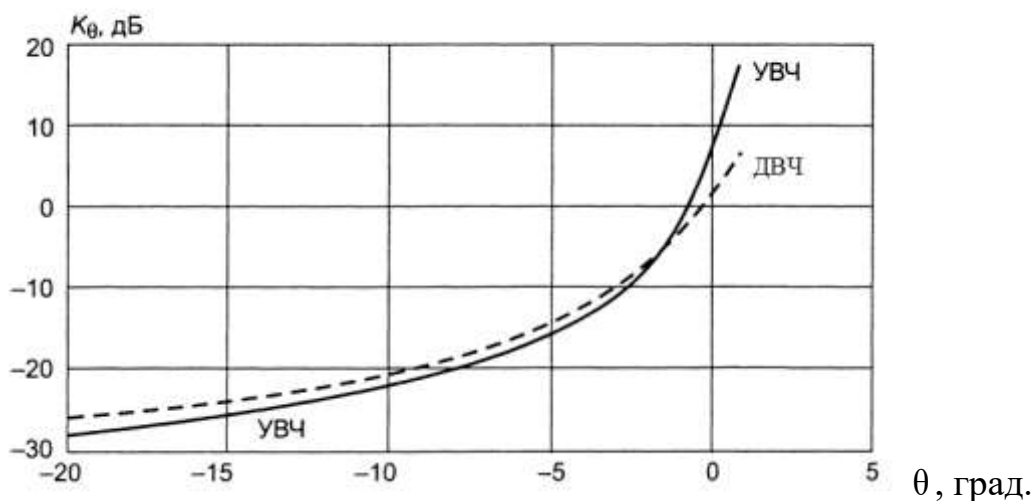


Рисунок 4.6 – Коефіцієнт корекції на кут просвітку місцевості

5. Коефіцієнт, який враховує кліматичні регіони $K_{\Delta N}$. Відомо, що напруженість поля у різних кліматичних регіонах різна. Існує кореляція значень середньої напруженості поля з *градієнтом індексу рефракції* в першому кілометрі атмосфери над рівнем землі. Якщо *коефіцієнт рефракції* ΔN для певного регіону помітно відрізняється від 40, то для розрахунку напруженості поля необхідно використати поправний коефіцієнт:

$$K_{\Delta N} = 0,5(\Delta N - 40), \text{ дБ.} \quad (4.8)$$

Якщо ΔN невідомо, але є інформація стосовно середнього значення *індексу заломлення* $N_s = (n_s - 1) \cdot 10^{-6}$, де n_s *коефіцієнт заломлення* можна застосовувати альтернативний поправний коефіцієнт $K_{\Delta N} = 0,2(N_s - 310)$ дБ, для помірного клімату. Індекс заломлення поблизу поверхні Землі $N_s = 260 \dots 460$. У наших розрахунках застосовуємо 270...280.

6. Коефіцієнт підсилення $G(\theta)$ та поляризація антен.

Коефіцієнт підсилення визначає ступінь концентрації потужності у заданому напрямі $G(\theta)$ з урахуванням втрат у антені. Для напівхвильового вібратора, який застосовуємо як передавальну антену – 3,1 для приймальних антен – відповідно до завдання.

Основні види поляризації: лінійна – вертикальна та горизонтальна; обертові – кругові: правостороння та лівостороння та аналогічно еліптичні. В наших розрахунках для конкретної радіолінії – поляризації приймальної та передавальної антени – однакові. За різні поляризації маємо коефіцієнт поляризаційної розв'язки γ до мінус – 30 дБ. Це важливо під час розв'язання завдань стосовно забезпечення електромагнітної сумісності [6].

4.5 Висновки

Таким чином визначено рівень напруженості електричного поля у визначеній точці та, відповідно, необхідну чутливість приймача.

Також треба сформулювати висновки, щодо отриманих даних, обґрунтуванню розбіжностей результатів розрахунків за формулами ідеального радіозв'язку та – методикою статистичного аналізу.

ЛІТЕРАТУРА

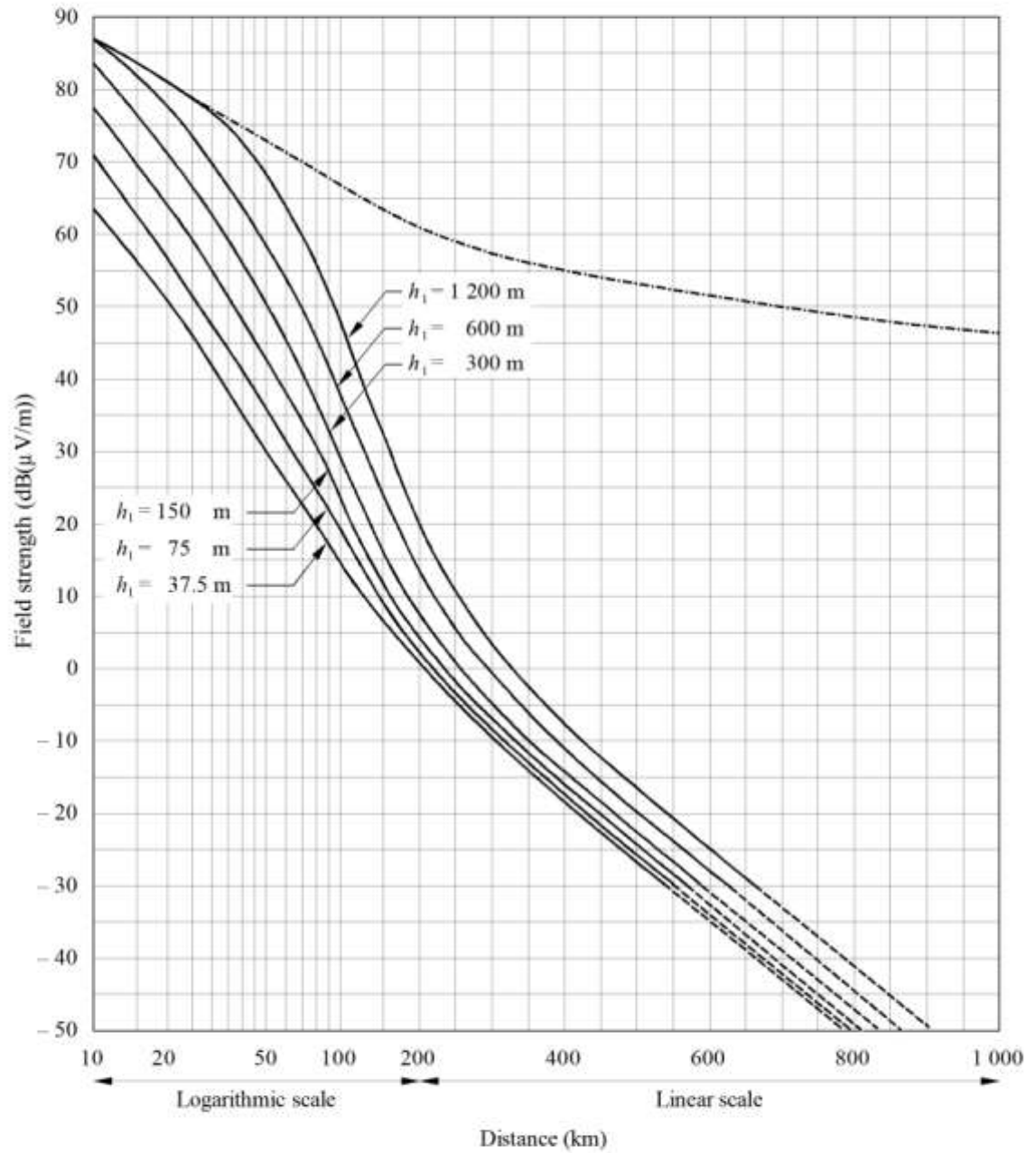
1. Інтерактивна карта GoogleMap. [Електронний ресурс].
2. Simon R. Saunders, Alejandro Aragon Zavala Antenas and Propagation for wireless communication system – British Library Cataloguing in Publication Data, Second edition.– 2007 – 553 p.
3. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. Навчальний посібник з грифом НТУУ «КПІ». К.: Кафедра, 2014. – 334 с.
4. Rec. ITU-R P.370-7. Recommendation ITU-R P.370-7* VHF and UHF Propagation Curves for the Frequency Range from 30 MHz to 1 000 MHz Broadcasting Services (Question ITU-R 203/3) (1951-1953-1956-1959-1963-1966-1974-1978-1982-1986-1994-1995). – 33 p.
5. Байков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 224 с.
6. Пілінський В. В. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів. Навчальний посібник для студентів напрямів підготовки 6.050803 «Акустотехніка», 6.050903 Телекомунікації. Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» 2010 НМУ № Е10/11-156 від 23.12.2010, прот. №4. – 374 с.

ДОДАТОК

Криві поширення Міжнародного Союзу Електрозв'язку

Rec. ITU-R P.370-7

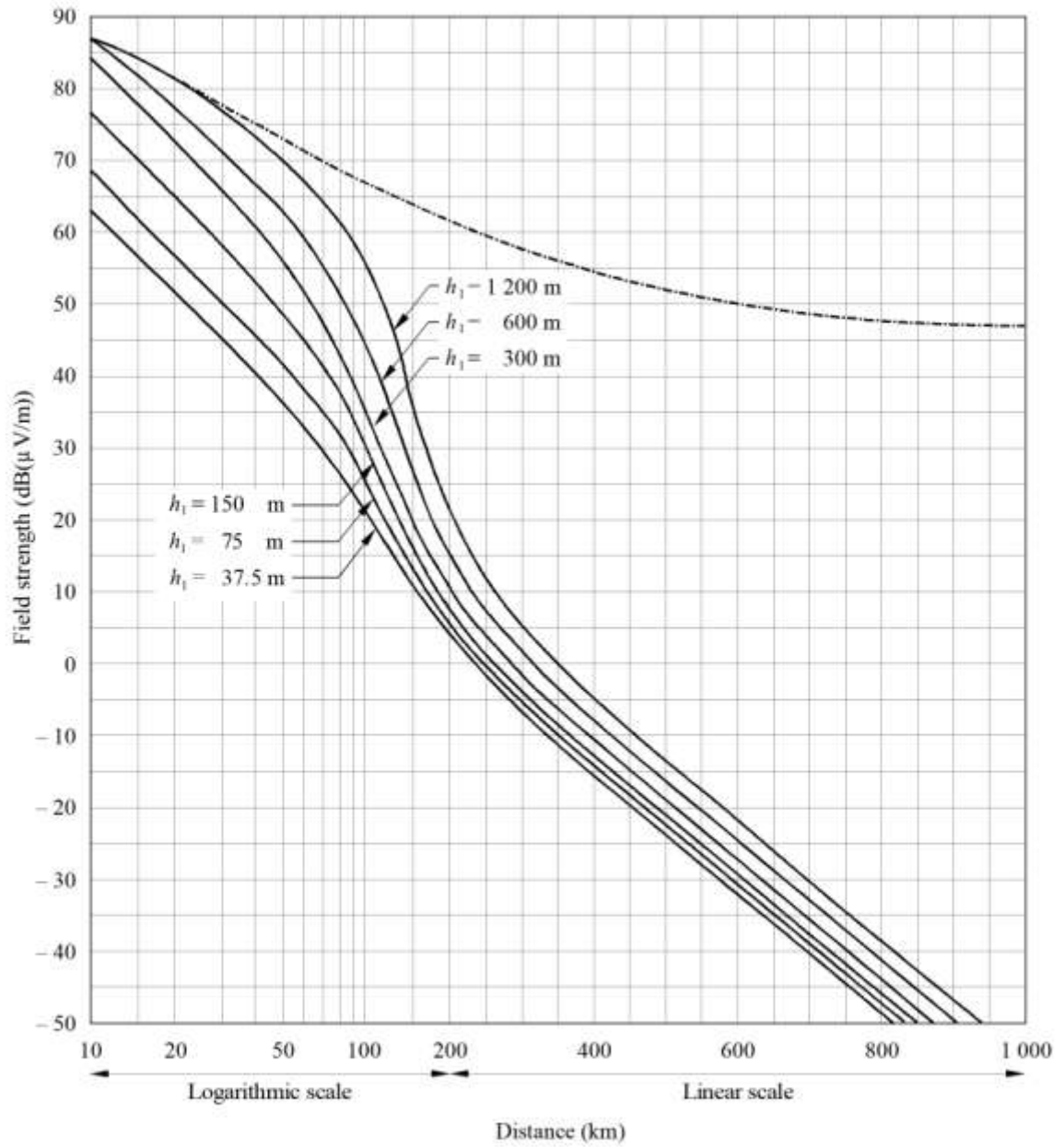
FIGURE 1a
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); land; 50% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m; $\Delta h = 50$ m

--- Free space

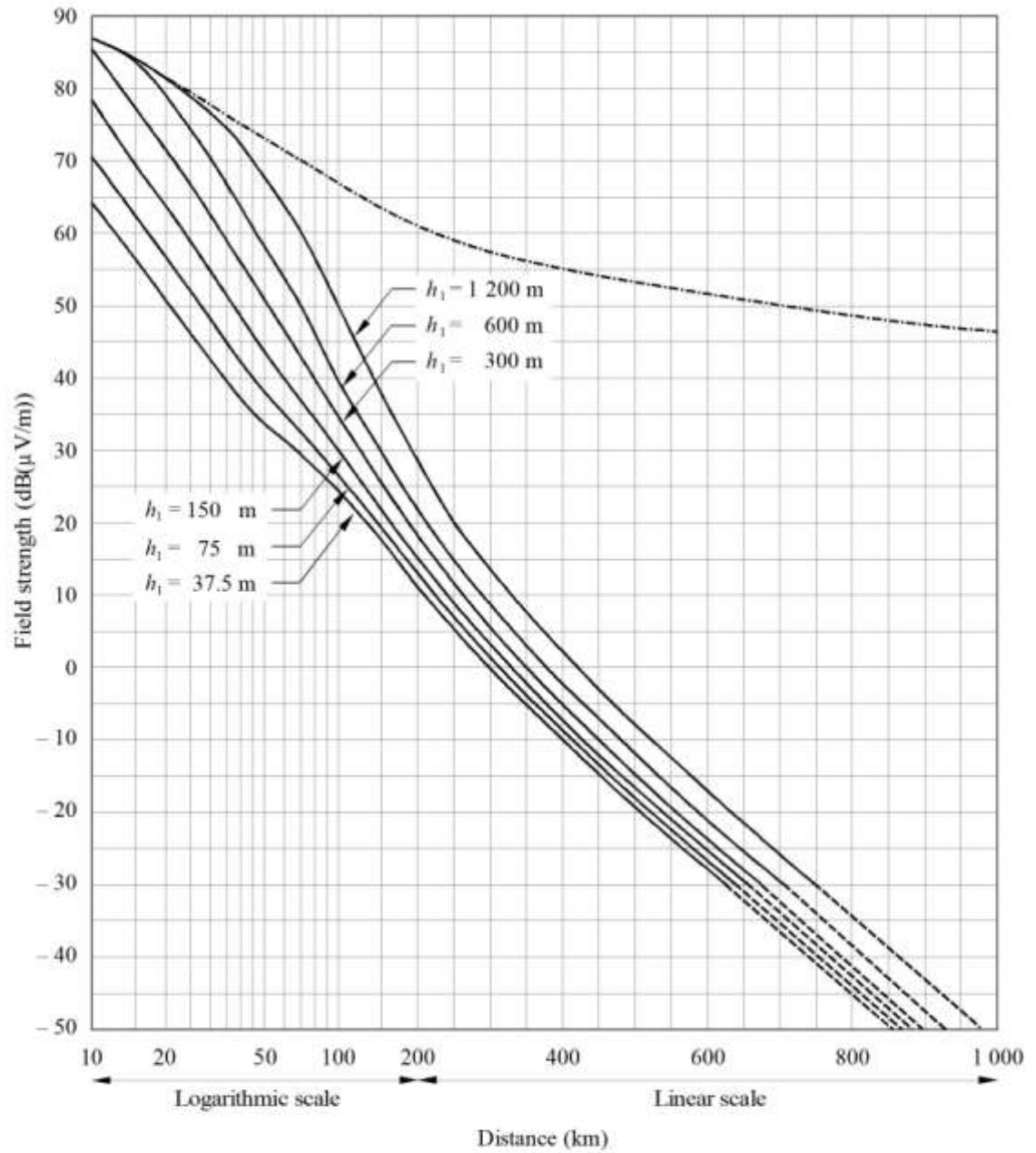
FIGURE 1b
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); sea; 50% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m

----- Free space

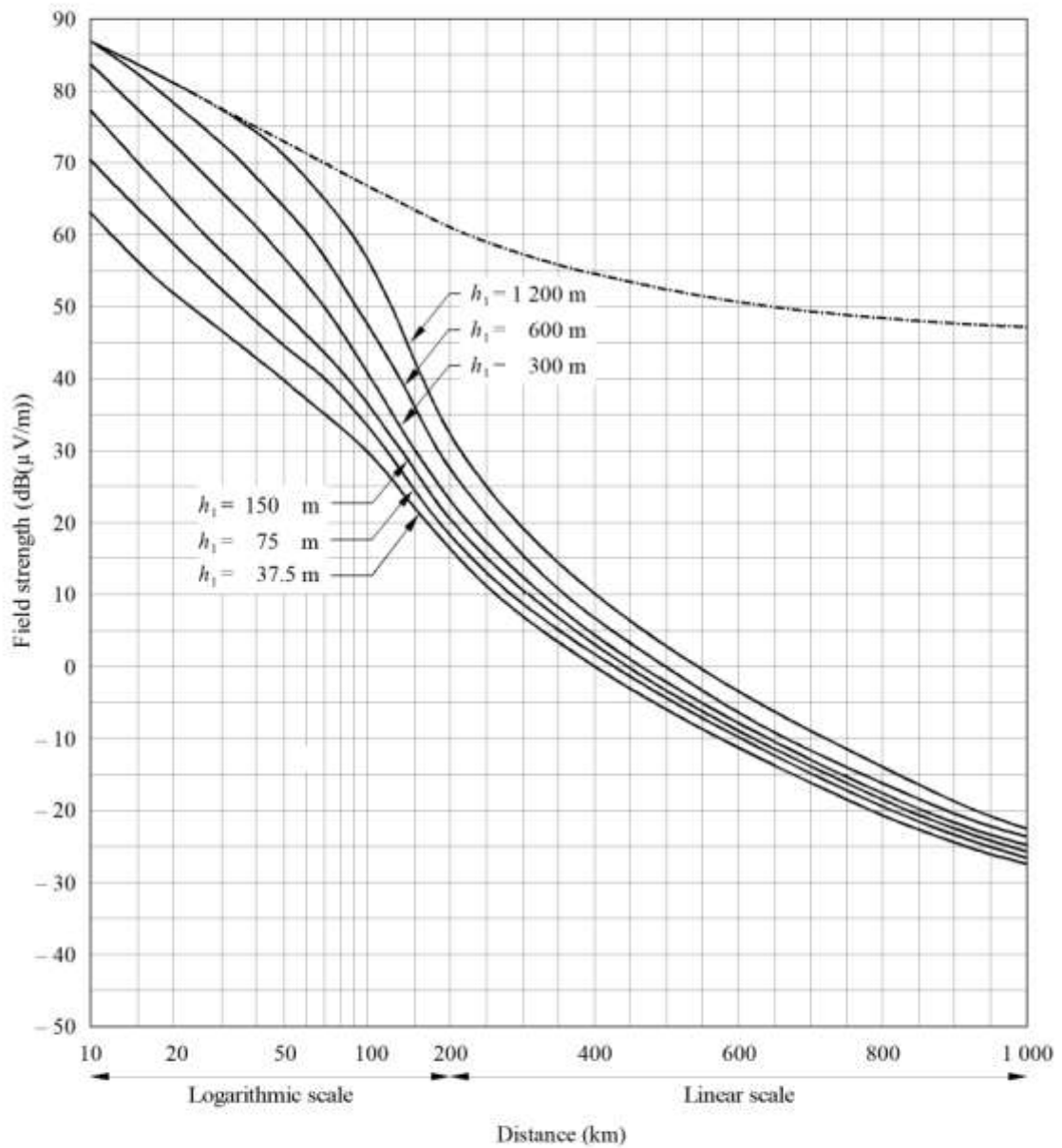
FIGURE 2a
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); land; 10% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m; $\Delta h = 50$ m

----- Free space

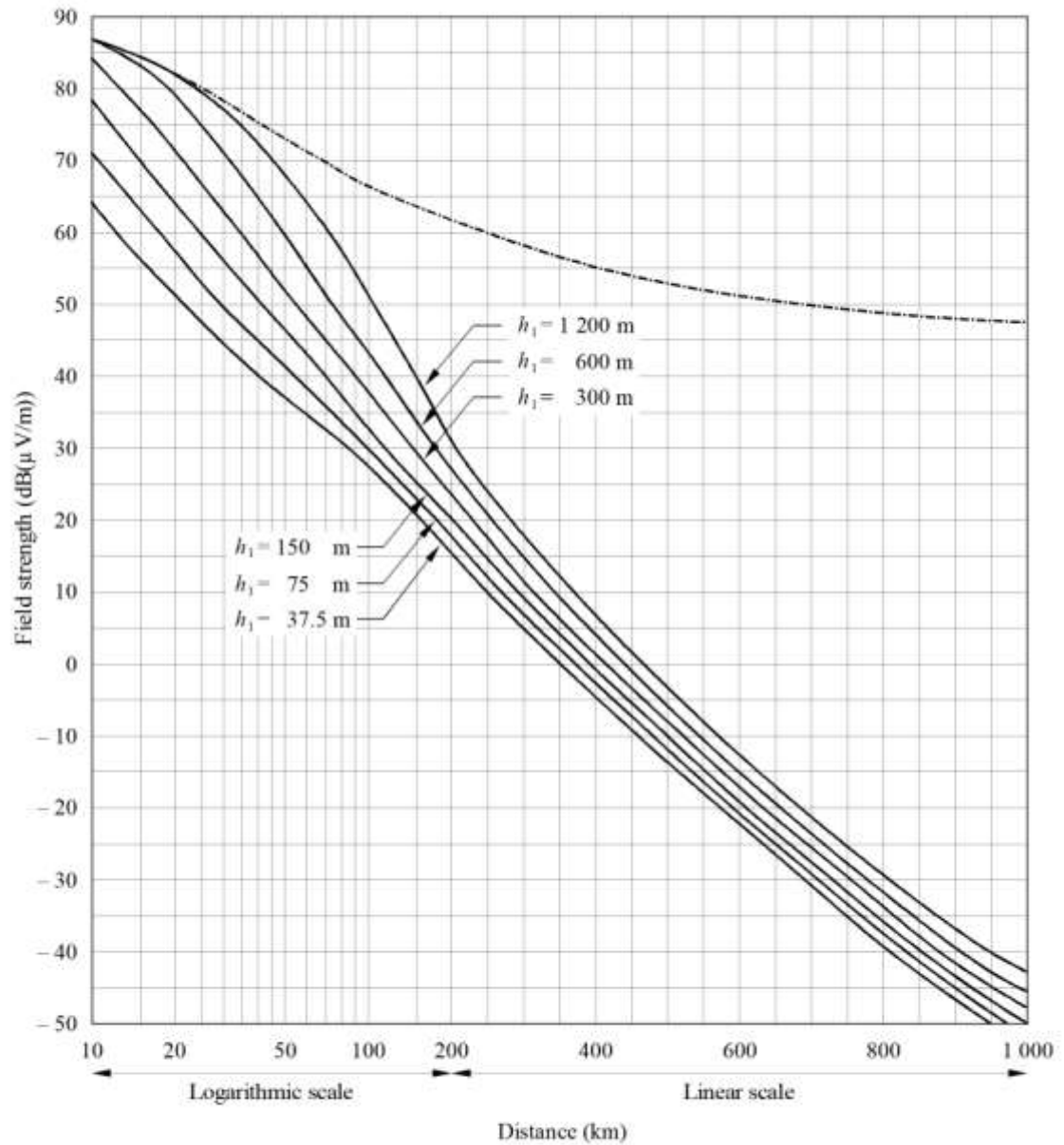
FIGURE 2c
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); warm sea; 10% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m

----- Free space

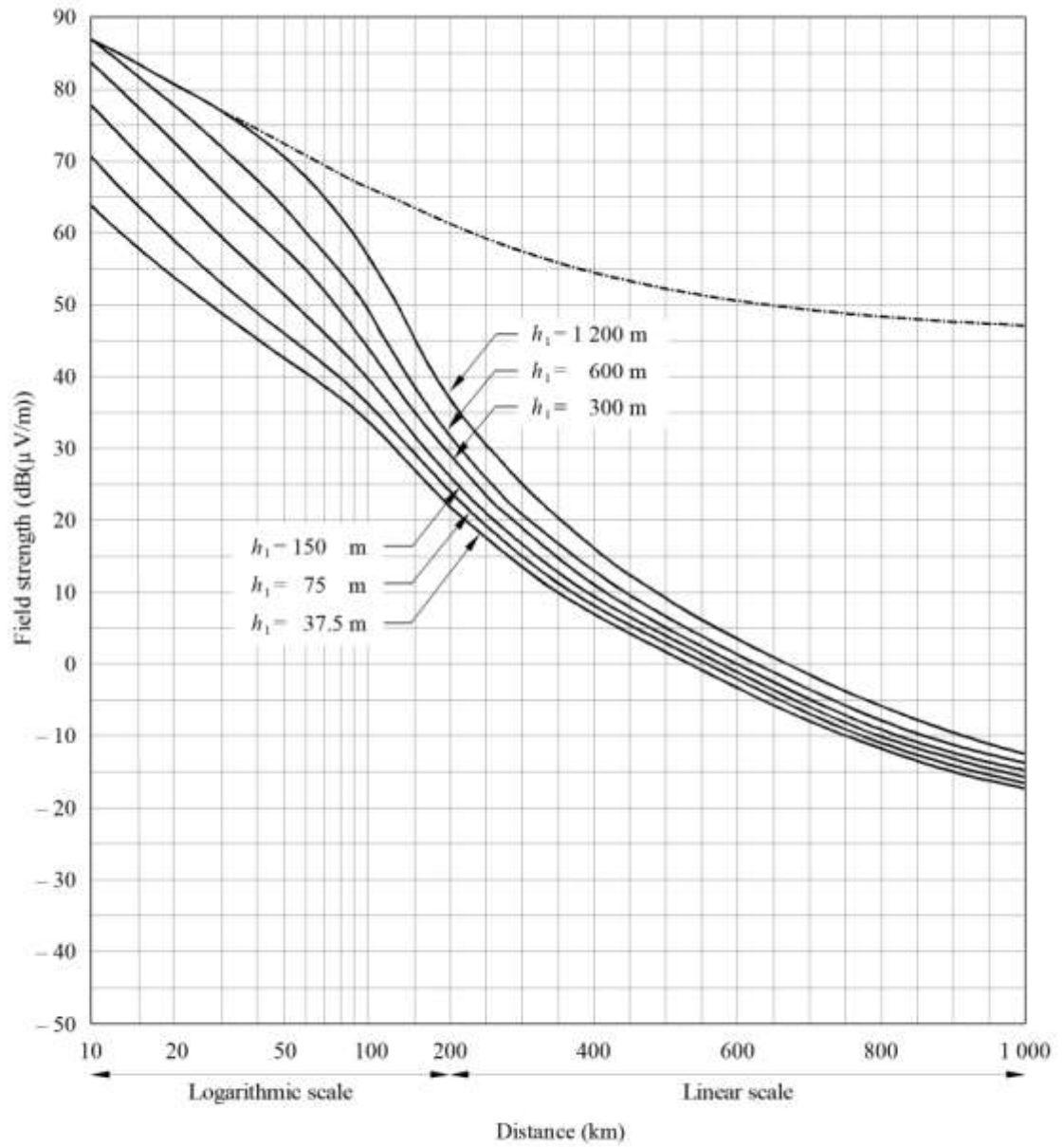
FIGURE 3a
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); land; 5% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m; $\Delta h = 50$ m

----- Free space

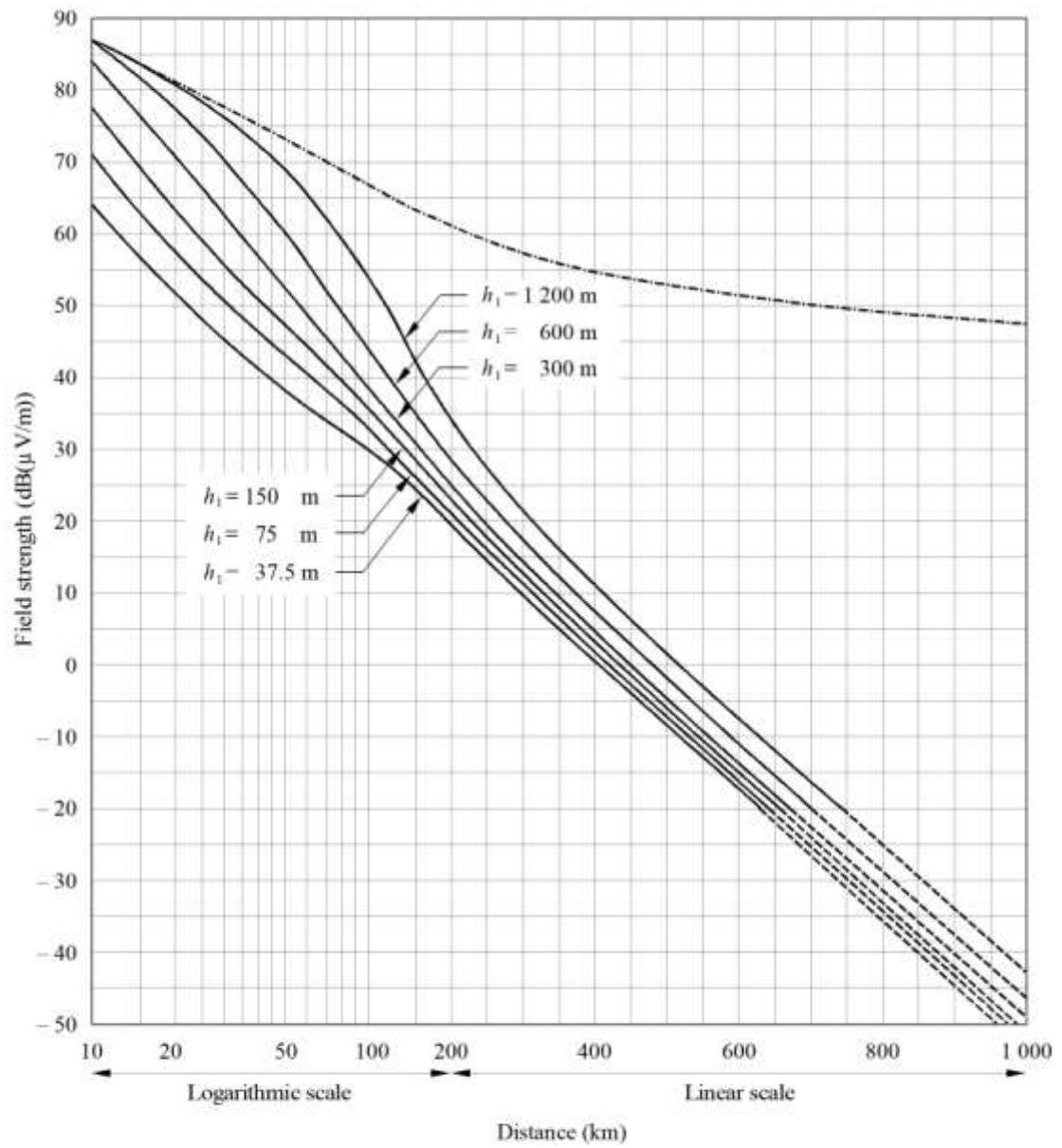
FIGURE 3c
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); warm sea; 5% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m

--- Free space

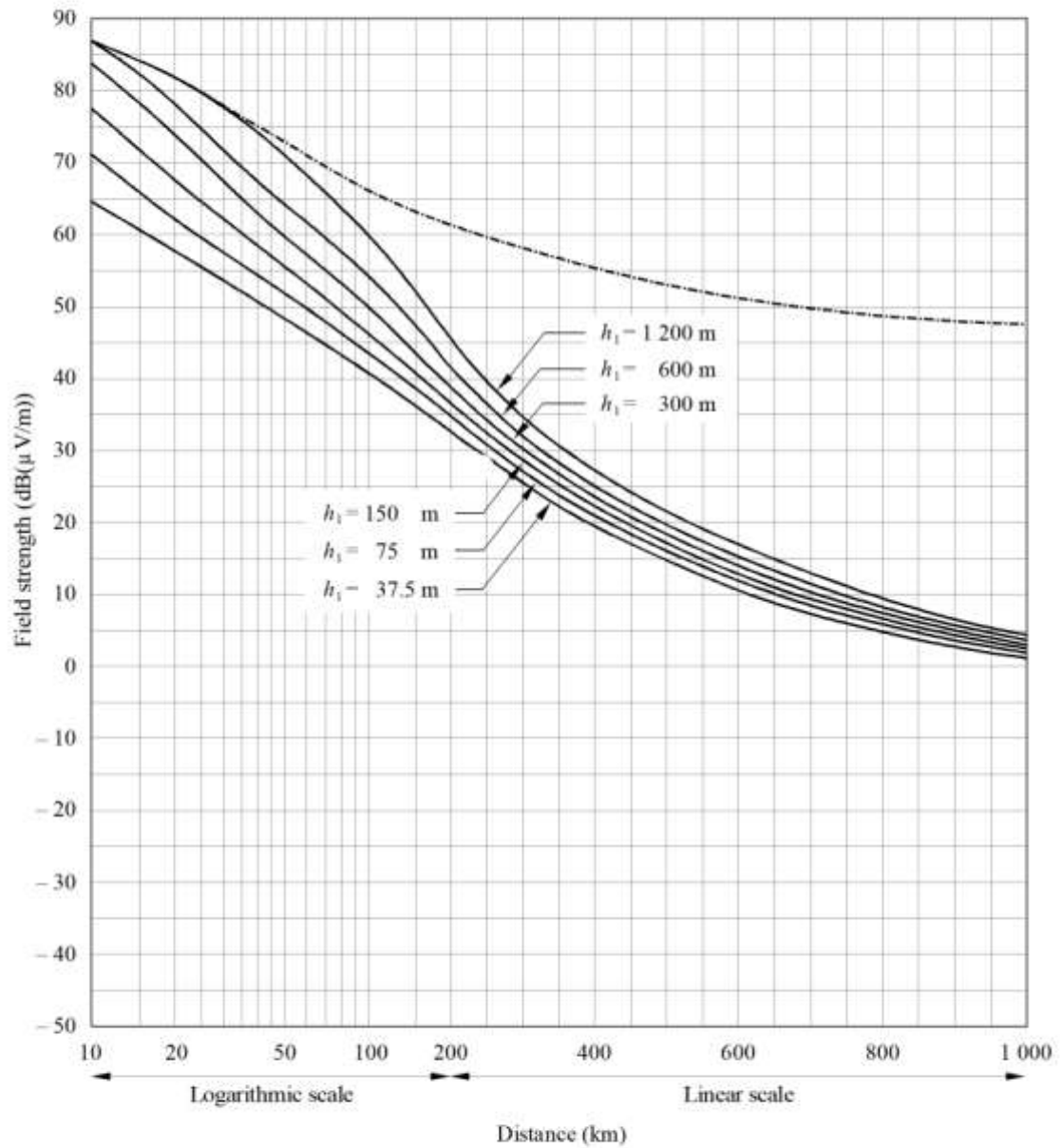
FIGURE 4a
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); land; 1% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m; $\Delta h = 50$ m

----- Free space

FIGURE 4c
Field strength (dB(μ V/m)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); warm sea (excluding areas subject to extreme super-refraction); 1% of the time; 50% of the locations; $h_2 = 10$ m

----- Free space